第40卷 第8期
2023年8月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 8
Aug. 2023

黄土丘陵区天然杜松种群结构及动态分析

宋佳佳[1]， 李钢铁[1]， 郭靖捷[1]， 谷忠厚[2]， 刘 坤[2]， 李治龙[3]， 康 霞[4]

（1. 内蒙古农业大学沙漠治理学院，内蒙古 呼和浩特 010018；2. 鄂尔多斯市林业和草原事业发展中心，内蒙古 鄂尔多斯 017000；3. 鄂尔多斯市林业和草原调查勘验中心，内蒙古 鄂尔多斯 017000；4. 伊金霍洛旗水利技术服务中心，内蒙古 伊金霍洛旗 017200）

摘 要：以内蒙古黄土丘陵区天然杜松种群为研究对象，通过静态生命表、生存函数、动态量化分析以及时间序列模型分析天然杜松种群结构和动态变化。结果表明：幼苗个体数量居多，中树其次，成树较少，结合种群数量动态变化指数 $V_{pi}>0$，该种群则为增长型；存活曲线经曲线模型验证趋于Deevey-Ⅱ型，表明个龄级死亡率稳定；考虑外界干扰时动态指数趋于0，种群在干扰条件下增长不明显；生存函数分析种群表现为前期生存强中期稳定后期逐渐衰退的趋势；未来2~8各个龄级时间后，幼苗减少，中树和成树均增加；幼苗阶段对种群的更新和发展具有决定作用，建议对幼苗实施科学的保护措施，促进种群的更新。对杜松种群内在机制的研究，丰富了干旱区的植被建设，为杜松种群经营管理提供了参考，为黄土丘陵区植被的保护和恢复提供理论依据。

关键词：黄土丘陵区；杜松；种群结构；生存分析；动态分析

种群是研究生态学的基本单位，种群结构与数量动态是种群的生态学研究的核心问题，种群结构反映了种群不同个体的的配置情况，也反映种群数量动态及其发展趋势，体现了种群在此环境的地位[1]。基于径级结构和静态生命表等，研究植物的种群结构与动态特征有利于揭示种群生物学特性与生境之间的关系[2]，对植物资源保护和利用具有重要的理论指导意义[3]。

杜松（*Juniperus rigida*）[4]属于柏科刺柏属常绿灌木或小乔木，生于比较干旱的地区。是我国黄土丘陵区重要树种之一，紧邻黄河流域，杜松树种在该地的水土保持具有极其重要的意义，在保土固沙、涵养水源方面等起重要作用。近年来，研究广泛于杜松的精油开发与利用[5]、育苗技术[6]、繁殖特性[7]等方面，多数学者对杜松栽培技术展开研究[8-9]。刘雨等[10]研究了杜松表型多样性及感化作用，而天然杜松林种群的调查和记载极少，内蒙古黄土丘陵区，深居内陆，降水量稀少，生态环境敏感脆弱[11]，采矿业的发达，伐木开矿，杜松的森林资源生产力危在旦夕，杜松种群在维护黄土丘陵区生态系统的平衡和稳定性具有不可替代的作用[12]。探究天然杜松林的种群结构及动态特征刻不容缓，为杜松种群经营管理和生态评估提供数据，丰富黄土丘陵区的植被建设，对内蒙古干旱区植被的保护和恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区西南部鄂尔多斯市东部西营子（110°05′~111°27′E，39°16′~40°20′N），地貌结构为典型的黄土丘陵沟壑区，西、北、东三部分被黄河河湾怀抱，海拔多在1200~1400 m之间。深居内陆，大陆气候显著，受季节风影响，夏季多偏南或偏东风，秋至春多西北风；年平均气温为6.2~8.7 ℃，光能资源丰富，日照总时数1710 h，昼夜温差14.1 ℃；降雨变化大，降雨主要集中在7—9月，年平均降水量为400 mm；土壤多为栗钙土。

1.2 样地设置

2022年8月底，通过遥感影像结合实地考察，选取天然杜松种群分布的典型样地。选取样地内具

收稿日期：2022-12-14； **修订日期：**2023-03-02
基金项目：鄂尔多斯市科技重大专项（2022EEDSKJZDZX012）
作者简介：宋佳佳（1997-），女，硕士研究生，主要从事沙区植物资源保护与利用. E-mail: hopesjj@163.com
通讯作者：李钢铁. E-mail: 13848817183@163.com

有代表性的地段，设置3条样带，每条样带等距取3个20 m×20 m的样方，坡上、坡中、坡下均有分布，共计9个样方，第一条样带位于110°41′57.5″E，39°28′28.2″N，海拔1160~1220 m，第二条样带位于110°41′39.3″E，39°28′35.1″N，海拔1140~1245 m，第三条样带位于110°41′55.8″E，39°28′20.6″N，海拔1140~1230 m，采集样地内每株天然杜松的基径、高度、冠幅、健康状况等数据。同时记录每个样方的生境、坡向、海拔等环境因子。

1.3 大小级划分

天然杜松林不易砍伐获取年龄，且枝叶呈针刺型，所以本研究选取以基径划分径级结构代替杜松的年龄结构[13-14]。第Ⅰ径级$X<2$ cm；第Ⅱ径级2 cm≤$X<5$ cm；第Ⅲ径级5 cm≤$X<10$ cm；第Ⅳ径级10 cm≤$X<15$ cm；第Ⅴ径级15 cm≤$X<20$ cm；第Ⅵ径级20 cm≤$X<25$ cm；第Ⅶ径级25 cm≤$X<30$ cm，第Ⅷ径级30 cm≤$X<35$ cm，第Ⅰ~Ⅲ径级为幼苗，第Ⅳ~Ⅵ径级为中树，第Ⅶ~Ⅷ径级为成树。

1.4 静态生命表

编制静态生命表是研究种群数量动态的有效方法[15]。即某特定时间的种群年龄结构的调查。静态生命表的统计参照董灵波、吴承祯等[16-17]方法。

为深入研究杜松种群结构和动态特征，参照李敏敏等[18-19]的研究引入生存率函数$S_{(i)}$、累计死亡率函数$F_{(i)}$、种群死亡密度函数$f_{(ti)}$以及种群危险率函数$\lambda_{(ti)}$4个函数阐述，具体公式如下：

$$S_{(i)} = S_1 \times S_2 \times S_3 \times \cdots \times S_i \quad (1)$$

$$F_{(i)} = 1 - S_{(i)} \quad (2)$$

$$f_{(ti)} = [S_{(i-1)} - S_{(i)}]/h_i \quad (3)$$

$$\lambda_{(ti)} = 2(1 - S_{(i)})/[h_i(1 + S_{(i)})] \quad (4)$$

式中：h_i为径级宽度；S_i为存活率。

1.5 种群动态数量化

参考陈晓德[20]的研究采用动态量化分析法，定量描述杜松种群结构，反映出种群两相邻年龄级个体数量的结构动态关系，具体公式如下：

$$V_n = \frac{A_n - A_{n+1}}{\max(A_n, A_{n+1})} \times 100\% \quad (5)$$

$$V_{pi} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{k-1} A_n} \sum_{n=1}^{k-1} (A_n V_n) \quad (6)$$

$$V'_{pi} = \frac{\sum_{n=1}^{k-1} A_n V_n}{\min(A_1, A_2, A_3, \cdots, A_k) k \sum_{n=1}^{k-1} A_n} \quad (7)$$

$$P_{极大} = \frac{1}{k \min(A_1, A_2, A_3, \cdots, A_k)} \quad (8)$$

式中：V_n为种群各径级个体数量的动态变化；A_n为各径级的个体数量；V_{pi}为忽略外界干扰的种群数量变化动态；k为总径级数；V'_{pi}为考虑未来的外界干扰的种群结构数量变化动态；$P_{极大}$表示对种群动态V_{pi}影响最大；V_n、V_{pi}、V'_{pi}的值为正时，种群呈增长，为负时呈衰退，为0时呈稳定。

1.6 时间序列模型

采用一次移动平均法预测杜松种群年龄结构[21]，其计算公式如下：

$$M_t^{(1)} = \frac{1}{n} \sum_{k=t-n+1}^{t} X_k \quad (9)$$

式中：n为需要预测的时间；t为径级；X_k为k径级的个体数量；$M_t^{(1)}$为经过未来n个径级后的数量。本研究预测2、3、4、5、6、7、8个径级时间内杜松种群动态变化趋势。

1.7 数据处理

利用Excel 2007和SPASS 21整理、分析数据，Origin 2019制图。

2 结果与分析

2.1 杜松种群结构

由图1可以看出，第Ⅰ龄级占总数的17.14%，第Ⅱ龄级稍大幼苗，占总调查数的20.57%，第Ⅲ龄级占总数最多，达23.43%，第Ⅳ~Ⅵ龄级均为中树，占总调查数的31.44%，第Ⅶ~Ⅷ龄级为成树所占总数比最小，为7.42%。杜松种群径级结构的整体趋势随着年龄增加杜松个体数先增长再减少，更新苗

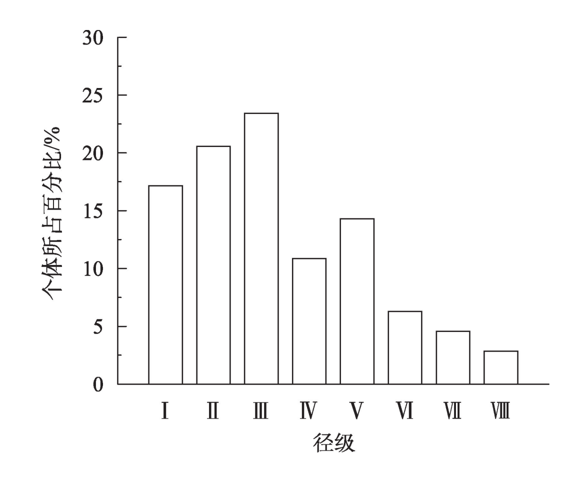


图1　杜松种群径级结构

Fig. 1　Diameter class structure of *Juniperus rigida* population

丰富，中树个体居多，部分幼苗可过渡至中树阶段，成树数量较少。杜松种群结构呈金字塔型，表现为增长型。

2.2 种群静态生命表

用空间代替时间编制杜松种群静态生命表可得出(表1)，杜松个体存活数由第Ⅰ龄级至第Ⅲ龄级呈增长趋势，第Ⅲ龄至第Ⅳ龄级呈下降趋势，第Ⅳ龄至第Ⅴ龄级上升，随后呈下降趋势，杜松个体存活随龄级增加呈波动式变化；第Ⅰ龄级的个体死亡数量(d_x)最高，随之呈递减的趋势，各个龄级死亡率(q_x)在0.2左右，杜松个体均具备一定的生活力和适应力；生命期望值(e_x)在第Ⅰ龄级最大，生理能力最旺盛，随龄级的增加呈递减趋势，表现出种群随年龄接近生理寿命；种群的消失率(K_x)均不超过0.3且整体波动较小；种群的存活率(S_x)均不低于0.70，杜松种群整体具备一定的生存能力，其中第Ⅵ龄级存活率最高，达0.82。

2.3 存活曲线分析

杜松种群存活曲线(图2)，便于直观描述种群的死亡。存活曲线结合静态生命表可以看出，第Ⅰ龄级死亡率最高，第Ⅷ龄级死亡率最低。存活曲线分3种类型，Ⅰ型为凸型球曲线，在到达一定生理年龄时全部死亡，Ⅱ型为对角线型，各个龄级的死亡率相近，Ⅲ型为凹型曲线，种群在幼年时易死亡，不易活至生理寿命。采用指数函数和幂函数模型分别检验，结果分别为$y=7.2785e^{-0.047x}$($R^2=0.9987$)和$y=7.2441x^{-0.155}$($R^2=0.9069$)，杜松种群更趋于指数函数模型，拟合结果$P<0.001$。因此，可以认为杜松种群的存活曲线趋向于Deevey-Ⅱ型。

2.4 生存分析

依据种群的演替，由图3可知，杜松种群的龄级与存活率呈负相关，龄级越大存活率越低，累计死亡率则相反，龄级越大累计死亡率越高。第Ⅰ龄级到第Ⅳ龄级生存率急剧下降，死亡率急剧上升，说明存在一定的竞争关系，生存不稳定，在接近第Ⅲ龄级时，交点处表明生存率和死亡率达到平衡，说明在此阶段杜松种群开始走向衰退趋势，第Ⅳ龄级到第Ⅶ龄级存活率相较平缓，第Ⅶ龄后开始急剧下降，说明其个体进入衰老期。由图4可知，种群死亡密度曲线在第Ⅰ龄级时最大，整体变化的波动较小，不超过0.1，杜松种群的危险率第Ⅰ龄级上升，第Ⅱ龄级有下降趋势，随后开始单调递增，总体函数值不超过0.4。综上所述，杜松种群前期适应能力较强，中期相对稳定，随后进入衰退期。

2.5 动态量化分析

根据杜松种群动态变化指数(表2)可以看出，在$V_{Ⅰ}$、$V_{Ⅱ}$、$V_{Ⅳ}$数值为负增长，其他表现均为正增长，动态指数的大小说明邻近龄级间的转化阻力大小，在$V_{Ⅴ}$动态指数最大，为56.00%，其次是$V_{Ⅲ}$可达53.66%，在第Ⅰ至Ⅱ龄级、在第Ⅱ至Ⅲ龄级、在第Ⅳ至Ⅴ龄级呈现衰退趋势，其他龄级均为增长趋势，整体表现为“衰退-增长-衰退-增长”的变化趋势。部分龄级阶段存在衰退趋势，在杜松种群忽略外界干扰时动态指数(V_{pi})为12.15%>0，可知杜松种群整体表现为增长型，考虑外界干扰(V'_{pi})时动态指数趋于0，杜松种群对外界干扰承担风险概率最大值($P_{极大}$)为0.03%，以上说明杜松种群受环境影响且有一定的敏感性，受到外界干扰时增长不明显。

表1 种群静态生命表

Tab. 1 Static life of population

x	A_x	a_x	l_x	$\ln l_x$	d_x	q_x	L_x	T_x	e_x	K_x	S_x
Ⅰ	30	47	1 000	6.91	234.04	0.23	883	8058	3.16	0.27	0.77
Ⅱ	36	36	766	6.64	191.49	0.25	670	7175	2.97	0.29	0.75
Ⅲ	41	27	574	6.35	148.94	0.26	500	6504	2.80	0.30	0.74
Ⅳ	19	20	426	6.05	106.38	0.25	372	6004	2.60	0.29	0.75
Ⅴ	25	15	319	5.77	85.11	0.27	277	5632	2.30	0.31	0.73
Ⅵ	11	11	234	5.46	42.55	0.18	213	5355	1.96	0.20	0.82
Ⅶ	8	9	191	5.25	42.55	0.22	170	5143	1.28	0.25	0.78
Ⅷ	5	7	149	5.00	–	–	74	4972	0.50	–	–

注：A_x为x径级存活数；a_x为x径级存活数在匀滑技术下的修正值；l_x为x径级标准化存活数；$\ln l_x$为x径级标准化存活对数；d_x为x径级到x+1径级死亡数；q_x为x径级死亡率；L_x为x到x+1径级的平均存活数；T_x为x径级及以后各径级的存活个体总数；e_x为进入x径级个体的生命期望；K_x为x径级的消失率；S_x为x径级的存活率。

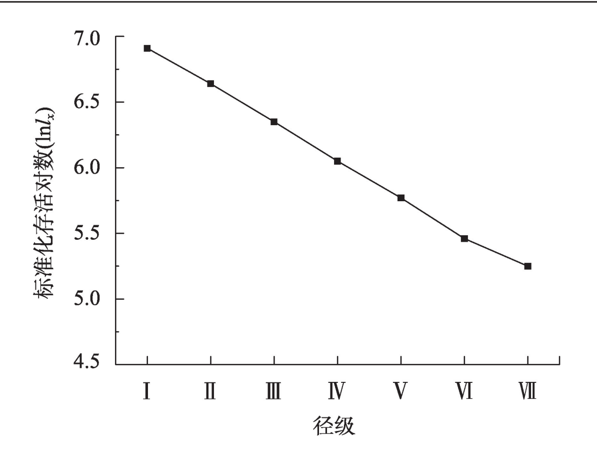


图2 杜松种群存活曲线

Fig. 2 *Juniperus rigida* population survival curve

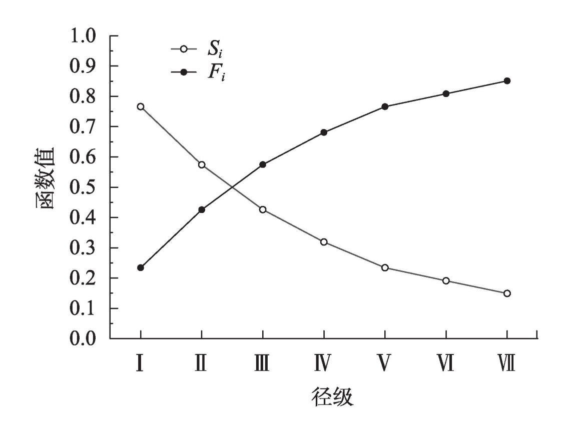


图3 生存率(S_i)与累计死亡率(F_i)曲线

Fig. 3 Survival and cumulative mortality curves

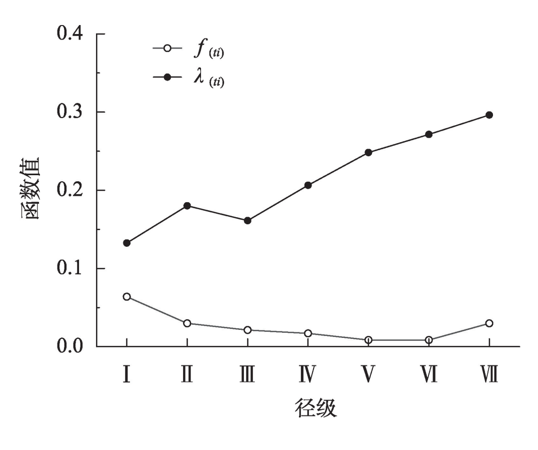


图4 死亡密度函数($f_{(ti)}$)和危险率函数($\lambda_{(ti)}$)曲线

Fig. 4 Death density function and risk function curve

2.6 时间序列预测

根据各径级的个体数量，预测杜松种群未来2、3、4、5、6、7、8龄级的个体数(表3)。第Ⅱ、Ⅲ龄级的个体数分别在未来2、3个龄级时间后减少，在第Ⅳ至Ⅷ龄级的个体数在未来8个龄级时间内逐渐增加，在第Ⅷ龄级表现显著，个体数量增加17株。综上所述，杜松种群幼苗丰富，在未来呈一定趋势减少，但为种群的数量提供大量的更新苗，幼苗中树和成树在未来呈增加趋势，总体在未来时间内表现一定数量的增长。

3 讨 论

3.1 杜松种群结构特征

种群的年龄结构反映了种群的数量动态及其发展趋势[22-23]。黄土丘陵区天然杜松种群数量61.14%的个体数量在幼苗期，种群具备一定的更新能力，中树期的个体数量所占总数量比的31.44%，为种群的稳定性提供保障，成树个体数量相对较少，种群结构呈金字塔为增长型。种群数量动态研究表明，在第Ⅰ~Ⅱ、Ⅱ~Ⅲ、Ⅳ~Ⅴ龄级间种群呈衰退趋势以外，其他龄级均呈增长型，在第Ⅰ~Ⅱ、Ⅱ~Ⅲ龄级间种群虽呈衰退趋势，但生存率高于死亡率，数量仍存在缓慢增长趋势，种群数量动态变化指数$V_{pi}>0$，种群整体为增长型特征，同静态生命表研究一致。种群数量集中于幼苗阶段，幼苗阶段进入中树阶段具有一定的障碍，与雅鲁藏布江三大支流流域小花水柏枝种群结构的研究相似[2]，这是生物学特性和环境因子共同作用的结果[24]。杜松种子体积大，质量重，数量多，种子成熟后限制其散落在母体周围，其繁殖特性使杜松种群形成小尺度上的聚集分布[25]。在幼苗期个体小时所需生长发育的环境资源相对少，聚集分布便于相互庇护，但幼苗阶段逐渐向中树阶段过渡，在密度制约下[26]，竞争光照，根系争夺养分、水分，同水平的资源竞争易导致个体数量下降[27]。第Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ龄级的个体数量趋于缓慢下降，种群适应环境趋于稳定状态。杜

表2 种群动态变化指数

Tab. 2 Index of population dynamics

$V_Ⅰ$	$V_Ⅱ$	$V_Ⅲ$	$V_Ⅳ$	$V_Ⅴ$	$V_Ⅵ$	$V_Ⅶ$	V_{pi}	V'_{pi}	$P_{极大}$
-16.67	-12.20	53.66	-24.00	56.00	27.27	37.50	12.15	0.30	0.03

表3 种群动态变化的时间序列预测

Tab. 3 Time series prediction of population dynamics

径级	原始数据	$M_2^{(1)}$	$M_3^{(1)}$	$M_4^{(1)}$	$M_5^{(1)}$	$M_6^{(1)}$	$M_7^{(1)}$	$M_8^{(1)}$
Ⅰ	30							
Ⅱ	36	33						
Ⅲ	41	39	36					
Ⅳ	19	30	32	32				
Ⅴ	25	22	29	31	31			
Ⅵ	11	18	19	24	27	27		
Ⅶ	8	10	15	16	21	24	24	
Ⅷ	5	7	8	13	14	19	21	22

松种群总体呈增长型,但在环境因子和竞争的筛选下,幼苗阶段不能大量转化为中龄阶段,导致中树个体数量减少,幼龄阶段是杜松种群更新与发展的重要阶段[28-29]。

3.2 杜松种群动态趋势

植物的种群数量动态是个体生存能力与外界环境相互影响[30]。研究表明,杜松种群的静态生命表显示,各个龄级的杜松个体数在环境和竞争筛选后,种群数量减少,但消亡率不大;随着龄级增加期望值降低,在第Ⅰ龄级生命期望值最大,幼苗期环境资源充沛、竞争力小,幼苗适应性强,生长发育良好,保证了杜松种群的更新能力[30]。存活曲线经曲线模型验证趋于Deevey-Ⅱ型,各龄级死亡率相近,研究结果与红桦种群[31]和大兴安岭天然林[16]的存活曲线类型一致。杜松种群对外界干扰承担风险概率较低,种群对外界干扰高度敏感,受到干扰时种群增长不明显[32]。

生存函数可以反映种群的增长与衰退的动态过程[33]。研究表明,第Ⅰ至Ⅱ龄级间生存率大于累计死亡率,更新苗数量充足,对环境筛选造成的死亡可以补给,在第Ⅱ至Ⅲ龄级间,生存率等于累计死亡率,处于动态平衡状态,此后进入衰退状态,空间和资源配置是进入衰退期的主要因素[24],在有限空间里杜松生存所需营养物质增加,生境提供资源不充分,导致后期进入衰退阶段[34]。杜松种群死亡密度稳定,生存环境适宜,后期危险率逐渐升高,表明成树阶段存在障碍,与生理寿命使老龄期出现高死亡风险有关,同滇中矮杨梅种群结构与动态特征[35]的研究结果类似,表现为前期生存能力强中期稳定后期逐步衰退的趋势,与杜松种群结构[22]的研究一致。

3.3 杜松种群时间序列预测

依据时间序列预测可得出,第Ⅱ龄级个体数在2个龄级时间后减少,第Ⅲ龄级个体数在3个龄级时间后减少,幼龄阶段个体数量减少,第Ⅳ龄级后未来均呈现增加趋势,中树和成树在未来占主体,同辽东山区天然更新红松幼苗种群[36]和极小种群野生植物细果秤锤树种群[37]的时间序列预测相似;经实地考察,成年杜松冠幅大,幼苗和母树存在复杂的距离制约关系,原因可能就是由于幼苗在郁闭的植被类型中受到母株效应的限制[38],导致幼苗数量的减少,但少数老龄个体的死亡有助于幼苗的生长发育,促进种群的更新和发展,构成动态循环。在保证环境因子良好条件下杜松总数在未来表现增长趋势。

杜松是干旱区的主要造林树种之一,黄土丘陵区沟壑纵横,气候干旱,水土流失严重,加之当地的采矿发达,过度放牧,杜松种群在黄土丘陵区的防风固沙、涵养水源、调节气候具有重要的作用。短期不会走向毁灭性衰退,不给予保护易有衰退风险,建议加大科学力度就地保护幼苗工作,建立自然保护区,实施水土保持生物工程,在黄土丘陵区生态恢复过程中发挥作用。

4 结 论

杜松种群结构金字塔型,幼龄阶段决定种群更新和发展,总体表现数量增长型。杜松种群存活曲线趋于Deevey-Ⅱ型,死亡率稳定。杜松种群的龄级与存活率呈负相关,龄级越大存活率越低,累计死亡率则相反,龄级越大累计死亡率越高。杜松种群整体具备一定的生存能力,前期适应能力较强,中期相对稳定,随后进入生理衰退期。对杜松种群进行数量动态分析可得,受到外界干扰时增长不明显,对外界随机干扰有一定的敏感性。杜松个体数量呈增加趋势,环境因子良好条件下,总体在未来一定时间内表现一定数量的增长。杜松种群短期无急剧衰退趋势,建议科学保护幼苗,有助于生态恢复。

参考文献(References):

[1] 赵阳, 齐瑞, 焦健, 等. 尕海-则岔地区紫果云杉种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7447-7457. [Zhao Yang, Qi

Rui, Jiao Jian, et al. The population structure and dynamic characteristics of *Picea purpurea* at the Gahai-zecha area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(20): 7447-7457.]

[2] 卫波宁, 常子惠, 张永娟, 等. 雅鲁藏布江三大支流流域小花水柏枝种群结构及动态特征[J]. 生态学报, 2022, 42(24): 10241-10252. [Wei Boning, Chang Zihui, Zhang Yongjuan, et al. Population structure and dynamic characteristics of *Myricaria wardii* in the basin of three branches of Yarlung Zangbo River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(24): 10241-10252.]

[3] 杨彪, 张全建, 龚旭, 等. 雅砻江冬麻豆(*Salweenia bouffordiana*)种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1184-1194. [Yang Biao, Zhang Quanjian, Gong Xu, et al. Population structure and dynamic characteristics of *Salweenia bouffordiana*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1184-1194.]

[4] 中国科学院中国植物志编委会. 中国植物志：第7卷[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 8-9. [Editorial Committee of the Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China: Vol.7[M]. Beijing: Science Press, 2004: 8-9.]

[5] 王堃, 徐先存. 杜松精油成分分析及其抗焦虑作用研究[J]. 云南化工, 2022, 49(5): 58-60. [Wang Kun, Xu Xiancun. Analysis of essential oil components and its anti-anxiety effect: A case study of *Juniper* essential oil[J]. Yunnan Chemical Industry, 2022, 49(5): 58-60.]

[6] 王燕清. 杜松种子育苗技术[J]. 山西林业科技, 2022, 51(2): 46-47. [Wang Yanqing. Seed seedling techniques of *Juniperus rigida* [J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2022, 51(2): 46-47.]

[7] 张亚芳. 黄土高原不同地区杜松种群动态及繁殖特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. [Zhang Yafang. Study on Different *Juniperus rigida* Population Dynamics and Reproductive Characteristics of Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014.]

[8] 黄荣雁, 贯春雨. 杜松育苗及栽培技术[J]. 防护林科技, 2019, 37(11): 94-95. [Huang Rongyan, Guan Chunyu. Cultivation technology of *Juniperus rigida*[J]. Shelter Forest Science and Technology, 2019, 37(11): 94-95.]

[9] 李振勇. 冀北地区杜松的栽培与管理[J]. 河北林业科技, 2011, 39(2): 97. [Li Zhenyong. Cultivation and management of *Juniper* in northern Hebei[J]. Hebei Forestry Publicity Center, 2011, 39(2): 97.]

[10] 刘雨. 宁夏贺兰山杜松(*Juniperus rigida*)表型多样性与化感作用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011. [Liu Yu. Phenotypic Diversity and Allelopathic Effect of *Juniperus rigida* in Helan Mountain, Ningxia[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2011.]

[11] 苏日罕, 郭恩亮, 王永芳, 等. 1982—2020年内蒙古地区极端气候变化及其对植被的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(1): 419-431. [Su Rihan, Guo Enliang, Wang Yongfang, et al. Extreme climate change in the Inner Mongolia and their impacts on vegetation dynamics during 1982-2020[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(1): 419-431.]

[12] 刘建泉, 杨建红. 祁连圆柏种群结构和生活史分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 140-144. [Liu Jianquan, Yang Jianhong. Life histories and structure of *Sabina przewalskii* population[J]. Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(7): 140-144.]

[13] 姜在民, 和子森, 宿昊, 等. 濒危植物羽叶丁香种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2471-2480. [Jiang Zaimin, He Zisen, Su Hao, et al. Population structure and dynamic characteristics of the endangered *Syringa pinnatifolia* Hemsl[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2471-2480.]

[14] 徐俏, 赵万羽, 魏岩, 等. 阿尔泰山东部林区森林种群结构和空间分布格局[J]. 干旱区研究, 2022, 39(6): 1885-1895. [Xu Qiao, Zhao Wanyu, Wei Yan, et al. Forest population structure and spatial distribution pattern of different age tree species in forest area of eastern Altai Mountains[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(6): 1885-1895.]

[15] 卢杰, 郭其强, 郑维列, 等. 藏东南高山松种群结构及动态特征[J]. 林业科学, 2013, 49(8): 154-160. [Lu Jie, Guo Qiqiang, Zheng Weilie, et al. Population structure and dynamic characteristics of *Pinus densata* in southeast Tibet[J]. Forestry Science, 2013, 49(8): 154-160.]

[16] 董灵波, 马榕, 田栋元, 等. 大兴安岭天然林不同演替阶段共优势种种群结构与动态[J]. 应用生态学报, 2022, 33(8): 2077-2087. [Dong Lingbo, Ma Rong, Tian Dongyuan, et al. Structure and dynamics of co-dominant species succession stages of natural forests in Daxing'an Mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(8): 2077-2087.]

[17] 吴承祯, 洪伟, 谢金寿, 等. 珍稀濒危植物长苞铁杉种群生命表分析[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 333-336. [Wu Chengzhen, Hong Wei, Xie Jinshou, et al. Life table analysis of *Tsuga longibracteata* population[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(3): 333-336.]

[18] 李敏敏, 刘鹏程, 孔维民, 等. 濒危植物澜沧黄杉种群结构及动态特征[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5504-5515. [Li Minmin, Liu Pengcheng, Kong Weimin, et al. Population structure and dynamic characteristics of the endangered *Pseudotsuga forrestii* Craib[J]. Acta Ecological Sinica, 2022, 42(13): 5504-5515.]

[19] 王飞, 霍怀成, 赵阳, 等. 甘南高山林线岷江冷杉—杜鹃种群结构与动态[J]. 植物研究, 2019, 39(5): 664-672. [Wang Fei, Huo Huaicheng, Zhao Yang, et al. Population structure and dynamics of original *Abies faxoniana* Rehd-*Rhododendron simsii* Planch in High-mountain timberline of southern Gansu Province[J]. Botanical Research, 2019, 39(5): 664-672.]

[20] 陈晓德. 植物种群与群落结构动态量化分析方法研究[J]. 生态学报, 1998, 18(2): 104-107. [Chen Xiaode. A study on the method of quantitative analysis for plant population and community structure dynamics[J]. Acta Ecologica Sinica, 1998, 18(2): 104-107.]

[21] 肖宜安, 何平, 李晓红, 等. 濒危植物长柄双花木自然种群数量

动态[J]. 植物生态学报, 2004, 42(2): 252−257. [Xiao Yi'an, He Ping, Li Xiaohong, et al. Sutdy on numeric dynamics of natural population of the endangered species *Disanthus cercidifolius* var. *Longipes*[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2004, 42(2): 252−257.]

[22] 杨小平, 周龙, 蒋丽丽, 等. 野生樱桃李的种群统计与生存分析[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(2): 154−160. [Yang Xiaoping, Zhou Long, Jiang Lili, et al. Population statistics and survival analysis of *Prunus divaricata*[J]. Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(2): 154−160.]

[23] 张金峰, 葛树森, 梁金花, 等. 长白山阔叶红松林红松种群年龄结构与数量动态特征[J]. 植物生态学报, 2022, 46(6): 667−677. [Zhang Jinfeng, Ge Shusen, Liang Jinhua, et al. Population age structure and dynamics of *Pinus koraiensis* in a broadleaved Korean pine forest in Changbai Mountain, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(6): 667−677.]

[24] 李俊清, 祝宁. 红松的种群结构与动态过程[J]. 生态学杂志, 1990, 9(4): 8−12. [Li Junqing, Zhu Ning. Population structure of *Pinus koraiensis* and its dynamics[J]. Chinese Journal of Ecology, 1990, 9(4): 8−12.]

[25] 邱华, 舒皓, 吴兆飞, 等. 长白山阔叶红松林乔木幼苗组成及多度格局的影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(6): 2049−2056. [Qiu Hua, Shu Hao, Wu Zhaofei, et al. Influencing factors of composition and abundance pattern of tree seedlings inbroad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis*) mixed forest, Changbai Mountain, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 2049−2056.]

[26] 姚杰, 宋子龙, 张春雨, 等. 距离和密度制约对吉林蛟河阔叶红松林幼苗生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 108−117. [Yao Jie, Song Zilong, Zhang Chunyu, et al. Effects of distance and density dependence on seedling growth in a broadleaved *Korean pine* forest in Jiaohe of Jilin Province, northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 108−117.]

[27] 吴语嫣, 李守中, 孙畦涛, 等. 长汀水土流失区侵蚀劣地马尾松种群动态[J]. 生态学报, 2019, 39(6): 2082−2089. [Wu Yuyan, Li Shouzhong, Sun Zitao, et al. Population dynamics of *Pinus massoniana* on eroded land in the soil erosion area of Changting County [J]. Acta Ecological Sinica, 2019, 39(6): 2082−2089.]

[28] 刘鑫, 焦健, 王婷, 等. 巴丹吉林沙漠南缘沙地芦苇种群生态特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(1): 220−229. [Liu Xin, Jiao Jian, Wang Ting, et al. Population ecological features of *Phragmites australis* in sandy habitats on the southern edge of Badain Jaran Desert[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(1): 220−229.]

[29] 王童犇, 朱芩, 侯晓巍, 等. 祁连圆柏群落特征沿年降水量梯度的变化格局[J]. 干旱区研究, 2021, 38(6): 1695−1703. [Wang Tongben, Zhu Qin, Hou Xiaowei, et al. Community characteristics of *Juniperus przewalskii* along annual precipitation gradientst[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(6): 1695−1703.]

[30] 马丹丹, 库伟鹏, 夏国华, 等. 珍稀濒危植物堇叶紫金牛种群结构及动态分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 159−164. [Ma Dandan, Ku Weipeng, Xia Guohua, et al. Structure and dynamics of rare and endangered plant *Ardisia violacea* natural population[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition), 2021, 45(3): 159−164.]

[31] 高洪治, 黄欣, 宿昊, 等. 秦岭两地区红桦种群结构与动态特征[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(9): 12−20. [Gao Hongzhi, Huang Xin, Su Hao, et al. Structure and dynamic characteristics of *Betula albo-sinensis* populations in two regions in the Qinling Mountains of northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(9): 12−20.]

[32] 谭一波, 詹潮安, 肖泽鑫, 等. 广东南澳岛中华楠种群结构及动态特征[J]. 生态学杂志, 2010, 29(10): 1901−1906. [Tan Yibo, Zhan Chao'an, Xiao Zexin, et al. Population structure and dynamic characteristics of *Machilus chinensis* in Nan'ao Island, Guangdong Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(10): 1901−1906.]

[33] 唐凤, 邹天才, 杨乃坤, 等. 稀有濒危植物贵州红山茶种群结构及数量动态变化的研究[J]. 广西植物, 2022, 42(3): 520−529. [Tang Feng, Zou Tiancai, Yang Naikun, et al. Population structure and dynamics analysis of rare and endangered plant *Camellia kweichowensis*[J]. Guangxi Botany, 2022, 42(3): 520−529.]

[34] 张锦堂, 潘志立, 田云海, 等. 云龙天池国家级保护区云南松种群年龄结构及动态分析[J]. 生态学报, 2022, 42(22): 9091−9099. [Zhang Jintang, Pan Zhili, Tian Yunhai, et al. Age structure and dynamic of *Pinus yunnanensis* population in Yunlong Tianchi Nature Reserve[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 9091−9099.]

[35] 杨艳波, 蔡起航, 巩合德. 滇中矮杨梅种群结构与动态特征[J]. 西部林业科学, 2022, 51(5): 146−152. [Yang Yanbo, Cai Qihang, Gong Hede. Population structure and dynamic characteristics of *Myrica nana* in Central Yunnan[J]. Western Forestry Science, 2022, 51(5): 146−152.]

[36] 张晓鹏, 于立忠, 杨晓燕, 等. 辽东山区天然更新红松幼苗种群结构与动态[J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 289−296. [Zhang Xiaopeng, Yu Lizhong, Yang Xiaoyan, et al. Population structure and dynamics of *Pinus koraiensis* seedlings regenerated from seeds in a montane region of eastern Liaoning Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(2): 289−296.]

[37] 谭菊荣, 袁位高, 李婷婷, 等. 极小种群野生植物细果秤锤树种群结构与动态特征[J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3678−3687. [Tan Jurong, Yuan Weigao, Li Tingting, et al. Population structure and dynamic characteristics of an extremely small population plant *Sinojackia microcarpa*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3678−3687.]

[38] 彭闪江, 黄忠良, 彭少麟, 等. 植物天然更新过程中种子和幼苗死亡的影响因素[J]. 广西植物, 2004, 30(2): 113−121, 124. [Peng Shanjiang, Huang Zhongliang, Peng Shaolin, et al. Factors influencing mortality of seed and seedling in plant nature regeneration process[J]. Guangxi Botany, 2004, 30(2): 113−121, 124.]

Population structure and dynamic analysis of natural *Juniperus rigida* in a loess hilly area

SONG Jiajia[1], LI Gangtie[1], GUO Jingjie[1], GU Zhonghou[2], LIU Kun[2], LI Zhilong[3], KANG Xia[4]

(1. Desert Science and Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China; 2. Ordos Forestry and Grassland Development Center, Ordos 017000, Inner Mongolia, China; 3. Ordos Forestry and Grassland Survey and Inspection Center, Ordos 017000, Inner Mongolia, China; 4. Ejin Horo Banner Water Conservancy Technology Service Center, Ejin Horo Banner 017200, Inner Mongolia, China)

Abstract: This study focused on the natural *Juniperus rigida* population in the loess hilly region of Inner Mongolia. The structure and dynamic changes of the population were analyzed using a static life table, survival function, dynamic quantitative analysis, and time series model. The results showed that the population mainly comprised many individual seedlings, followed by medium and less mature trees. Combined with the dynamic change index $V_{pi} > 0$, the population was a growth type. The survival curve was verified using the curve model and tended to Deevey-II, indicating that the mortality rate of each age class was stable. Considering the external interference, the dynamic index tended to 0, and the population growth is not obvious under the interference condition. In the survival function analysis, the population showed a strong survival trend in the early stage, followed by a gradual decline in the middle stage. During the 2-to-8-year period, the number of seedlings decreased while middle-aged and adult trees increased. The seedling stage is crucial to the regeneration and development of the population. Therefore, implementing scientific protection measures for seedlings to promote population regeneration is recommended. Research on the internal mechanisms of the *Juniperus rigida* population can enrich vegetation construction in arid areas, provide a reference for population management, and provide a theoretical basis for vegetation protection and restoration in the loess hilly area.

Keywords: loess hilly region; *Juniperus rigida*; population structure; survival analysis; dynamic analysis